

Динамические характеристики бигармонического автогенератора

Д. А. Фролов¹, А. Р. Сафин^{1, 2✉}, Н. Н. Удалов¹, В. А. Сотсков³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт общей физики им. А. М. Прохорова" Российской академии наук, Москва, Россия

✉arsafin@gmail.com

Аннотация

Введение. Современные методы стабилизации частоты автоколебаний базируются на улучшении стабильности реактивных параметров схемы автогенератора и повышении добротности колебательной системы. Существует также возможность улучшения стабилизации частоты, основанная на явлении взаимной синхронизации мод автогенератора при использовании многоконтурной колебательной системы. Ранее был описан метод снижения фазового шума с синхронизацией двух мод в бигармоническом автогенераторе с кратными частотами, разработанный в предположении безынерционности активного элемента. Идея метода синхронизации основного колебания с его второй гармоникой с помощью дополнительного контура основана на соображении, что внутренние флуктуационные процессы в активном элементе синфазно модулируют все гармоники тока. Это позволяет использовать "естественную" взаимную корреляцию шумовых процессов с целью нейтрализации их влияния.

Цель работы. Построение и анализ математической модели бигармонического автогенератора с целью анализа режимов его работы и уменьшения фазового шума выходного колебания.

Материалы и методы. Математическая модель получена методом медленно меняющихся амплитуд, а анализ выполнен методами численного интегрирования и дифференцирования.

Результаты. В статье проведен анализ динамических режимов бигармонического трехточечного автогенератора, работающего в режиме фазовой синхронизации двух мод. Показано, что с ростом инерционности активного элемента синхронный режим сохраняется. Получены укороченные дифференциальные уравнения системы для медленно меняющихся амплитуд и фаз колебательных мод. Исследование нелинейной динамики и стационарного синхронного режима системы проведено методом фазового пространства в координатах "амплитуды мод – разность фаз".

Заключение. Натурный эксперимент и теоретические исследования позволяют сделать вывод о возможности уменьшения фазового шума в стационарном синхронном двухмодовом режиме, что может быть использовано для стабилизации частоты автогенераторов различной физической природы. Механизм преобразования фазовых и амплитудных колебаний в режиме синхронизации представляет значительный интерес с фундаментальной точки зрения не только для анализа флуктуаций, но и для преобразования модулированных колебаний в нелинейных избирательных устройствах.

Ключевые слова: бигармонический автогенератор, динамические процессы, фазовое пространство, фазовый шум

Для цитирования: Динамические характеристики бигармонического автогенератора / Д. А. Фролов, А. Р. Сафин, Н. Н. Удалов, В. А. Сотсков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-6-14

Источники финансирования. Грант Президента РФ для молодых кандидатов наук № МК-283.2019.8, грант РФФИ № 19-29-03015, грант Минобрнауки России № 075-15-2019-1947.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.06.2020; принята к публикации после рецензирования 30.07.2020; опубликована онлайн 29.09.2020

Dynamic Characteristics of a Biharmonic Self-Oscillator

Daniil A. Frolov¹, Ansar R. Safin^{1, 2✉}, Nikolay N. Udalov¹, Valery A. Sotskov³

¹National Research University "MPEI", Moscow, Russia

²Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉arsafin@gmail.com

Abstract

Introduction. Modern methods of stabilizing a frequency of self-oscillations use an improvement of the stability of reactive parameters of the self-oscillators circuit and an increase in the quality factor of an oscillating system. It is also possible to improve the frequency stabilization based on the phenomenon of mutual synchronization of the self-oscillator modes using a multi-loop oscillation system. Previously, a method for reducing a phase noise of an auto-oscillator with synchronization of two modes in a biharmonic auto-oscillator with multiple frequencies was described. The method was developed under the assumption that an active element is inertialess. The idea of the method of synchronizing of the main oscillation with its 2-nd harmonic using an additional loop is based on the consideration that internal fluctuation processes in the active element modulate in-phase all current harmonics. Therefore, it is possible to use this "natural" cross-correlation of noise processes to neutralize their influence.

Aim. Building and analysis of a mathematical model of a biharmonic oscillator in order to analyze the operating modes of such generator and reduction of the phase noise of its output oscillation.

Materials and methods. The mathematical model was developed by the method of slowly changing amplitudes, and the analysis was performed by methods of numerical integration and differentiation.

Results. It was demonstrated that synchronization of two oscillations at multiple frequencies in the active element reduced the phase noise of the main oscillation.

Conclusion. In the paper dynamic modes of a biharmonic Colpitts oscillator operating in the phase synchronization mode of two waves were analyzed. It was shown that with an increase in an inertia of the active element, the synchronous mode was preserved. Shortened differential equations of the system for slowly changing amplitudes and phases of oscillatory modes were obtained. The study of nonlinear dynamics and of stationary synchronous mode of the system was carried out by the method of phase space in coordinates of "mode amplitude – phase difference". The conducted field experiment allows one to conclude that it is possible to reduce the phase noise in a stationary synchronous biharmonic mode. It can be used in the frequency stabilization task.

Keywords: biharmonic self-oscillator, dynamic processes, phase space, phase noise

For citation: Frolov D. A., Safin A. R., Udalov N. N., Sotskov V. A. Dynamic Characteristics of a Biharmonic Self-Oscillator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-6-14

Financial support. Presidential grant for young scientists no. MK-283.2019.8, RFBR grant no. 19-29-03015, Ministry of Education and Science of Russia grant no. 075-15-2019-1947.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 23.06.2020; accepted 30.07.2020; published online 29.09.2020

Введение. Традиционные методы стабилизации частоты автоколебаний базируются на двух основных подходах: улучшении стабильности реактивных параметров схемы автогенератора [1] и повышении добротности колебательной системы [2–5]. Однако возможен другой путь, основан-

ный на явлении взаимной синхронизации мод. Так, в [6] описан метод снижения фазового шума (ФШ) на основе синхронизации двух мод в бигармоническом автогенераторе (БАГ) с кратными частотами [7], разработанный в предположении безынерционности активного элемента (АЭ).

Идея метода синхронизации основного колебания с его второй гармоникой с помощью дополнительного контура [6] основана на соображении, что внутренние флуктуационные процессы в АЭ синфазно модулируют все гармоники тока. Это позволяет использовать "естественную" взаимную корреляцию шумовых процессов с целью нейтрализации их влияния.

Экспериментально показано [8], что для БАГ на диодах Ганна наблюдается уменьшение ФШ. В [9], [10] исследована схема синхронизации двух наноразмерных спинтронных автогенераторов, для которых продемонстрирована также возможность снижения ФШ в режиме фазовой синхронизации. В связи с этим механизм преобразования фазовых и амплитудных шумов при синхронизации автоколебаний представляет значительный интерес с фундаментальной точки зрения для автогенераторов различной физической природы.

На рис. 1 показан пример схемы двухконтурного автогенератора (АГ). Инерционный АЭ представлен последовательным соединением безынерционного элемента с вольт-амперной характеристикой $i(u)$ и линии задержки на длительность τ_d . Указанная задержка вводится АЭ в гармоники выходного тока. Колебательная система представлена резонансными контурами с эквивалентными индуктивностями L_k , емкостями C_k и сопротивлениями R_k ($k = 1, 2$).

Типичная кривая затягивания, обеспечивающая стабилизацию частоты (рис. 2), показывает зависимость частот связи колебаний ω_k относительно парциальных резонансных частот контуров ω_{0k} в бигармоническом режиме АГ. Если допустить, что флуктуации выходной емкости АЭ приведут к увеличению частоты первого колебания

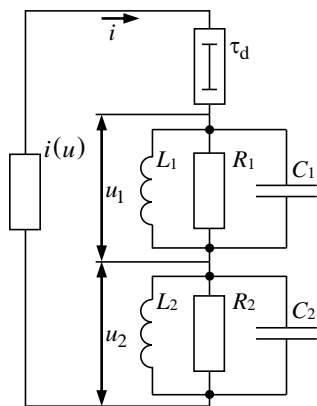


Рис. 1. Эквивалентная схема бигармонического автогенератора

Fig. 1. Equivalent circuit of a biharmonic self-oscillator

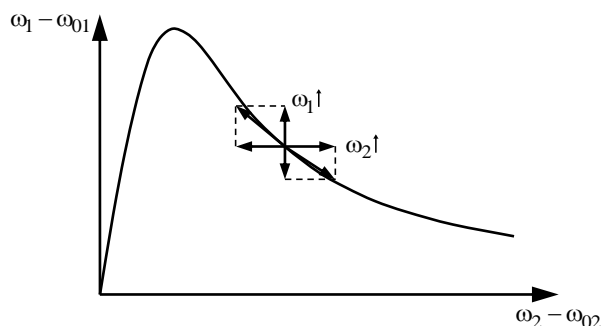


Рис. 2. Кривая затягивания частот бигармонического автогенератора

Fig. 2. Pulling curve of the biharmonic oscillator frequencies

($\omega_1 \uparrow$), то это вызовет смещение рабочей точки по направлению уменьшения частоты второго колебания. Напротив, изменение емкости, приводящее к увеличению частоты второго колебания ($\omega_2 \uparrow$), вызывает снижение частоты первого колебания. Таким образом, возникающие в системе эффекты изменяют частоты колебаний в противоположные стороны, что приводит к дополнительной стабилизации частот.

При работе генератора на частоте, близкой к граничной частоте транзистора, последний проявляет инерционные свойства. Этот эффект приводит к ухудшению условий самовозбуждения колебаний, однако в литературе нет анализа БАГ с инерционным АЭ.

Расчеты характеристик типичного СВЧ-транзистора [11] показали возможность упрощенного описания такого АЭ в виде нелинейного звена и последующей линии задержки, где, в первом приближении, запаздывание выходного тока прямо пропорционально номеру гармоники.

В настоящей статье представлены результаты анализа динамических процессов БАГ и приведены результаты натурного эксперимента с БАГ на транзисторе ММВТ3904 [12], который подтвердил эффект уменьшения ФШ в синхронном двухмодовом режиме.

Математическая модель. Опишем вольт-амперную характеристику АЭ на рис. 1 полиномом третьей степени [7], [13]:

$$i(u) = c_1 u + c_2 u^2 - c_3 u^3, \quad (1)$$

где коэффициенты $c_1, c_3 > 0$, а c_2 – любого знака.

Коэффициент передачи линии задержки имеет вид

$$Z_d(j\omega) = \exp(-j\omega\tau_d). \quad (2)$$

Известно [11], что время задержки для каждой гармоники зависит от ее номера и мало меняется при малых отстройках от рассматриваемых частот. Тогда для основной частоты $j\omega_{01}\tau_{d1} = j\tau$, а для второй частоты в синхронном режиме $j\omega_{02}\tau_{d2} = j2\tau$.

Предположим, что выходной сигнал БАГ имеет вид

$$u = u_1 + u_2 = U_1 \cos(\varphi_1) + U_2 \cos(\varphi_2), \quad (3)$$

где U_k , φ_k – амплитуды и фазы колебаний k -й моды, причем в синхронном режиме $\varphi_2 = 2\varphi_1 + \Delta\varphi$, а $\Delta\varphi$ – обобщенная разность фаз, которая в синхронном режиме является постоянной во времени величиной.

Укороченные коэффициенты передачи резонансных контуров имеют вид [14]:

$$\begin{aligned} Z_1(q) &= R_1 / (1 + qT_1); \\ Z_2(q) &= R_2 / [1 + (j\Delta\omega + q)T_2], \end{aligned} \quad (4)$$

где R_k – резонансные сопротивления контуров; $q = d/dt$ – оператор дифференцирования; $T_k = 2Q_k / \omega_{0k}$ – постоянные времени контуров; $\Delta\omega$ – расстройка второго контура относительно первого, причем Q_k – добротности контуров.

Система укороченных дифференциальных уравнений [14] с учетом (1)–(4) примет вид

$$\begin{cases} \frac{T_1}{U_1} \frac{dU_1}{dt} = R_1 [S_{a1} \cos(\tau) - S_{p1} \sin(\tau)] - 1; \\ \frac{T_2}{U_2} \frac{dU_2}{dt} = R_2 [S_{a2} \cos(\tau) - S_{p2} \sin(\tau)] - 1; \\ T_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = -R_1 [S_{p1} \cos(\tau) + S_{a1} \sin(\tau)]; \\ T_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = -R_2 [S_{p2} \cos(2\tau) + S_{a2} \sin(2\tau)] - \Delta\omega T_2, \end{cases} \quad (5)$$

где $S_{a1,2}$, $S_{p1,2}$ – средние значения крутизны.

Для получения выражений указанных средних значений $S_{a1,2}$, $S_{p1,2}$ подставим (3) в (1) и выделим множители при $\cos(\varphi_i)$ и $\sin(\varphi_i)$:

$$\begin{aligned} S_{a1} &= c_1 [1 - x_1^2 - 2x_2^2 + x_2 b \cos(\Delta\varphi)]; \\ S_{p1} &= -c_1 x_2 b \sin(\Delta\varphi); \\ S_{a2} &= c_1 \left[1 - x_2^2 - 2x_1^2 + \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \cos(\Delta\varphi) \right]; \\ S_{p2} &= c_1 \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \sin(\Delta\varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

где $x_k = U_k / U_m$ – нормированные амплитуды колебаний; $b = 4/\sqrt{k} = \sqrt{4c_2^2/(3c_1c_3)}$, $k = \sqrt{12c_1c_2/c_3^2}$ – коэффициенты, определяющие характеристику АЭ, причем $U_m = \sqrt{4c_1/(3c_3)}$ – амплитуда колебания в одночастотном режиме.

Тогда, подставив (6) в (5), получим систему укороченных уравнений для описания БАГ с учетом того, что в синхронном режиме $\varphi_2 = 2\varphi_1 + \Delta\varphi$:

$$\begin{cases} \frac{T_1}{x_1} \frac{dx_1}{dt} = c_1 R_1 \left[(1 - x_1^2 - 2x_2^2) \cos(\tau) + x_2 b \cos(\tau - \Delta\varphi) \right] - 1; \\ \frac{T_2}{x_2} \frac{dx_2}{dt} = c_1 R_2 \left[(1 - x_2^2 - 2x_1^2) \cos(2\tau) + \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \cos(2\tau + \Delta\varphi) \right] - 1; \\ \frac{d(\Delta\varphi)}{dt} = 2 \frac{c_1 R_1}{T_1} \left[(1 - x_1^2 - 2x_2^2) \sin(\tau) + x_2 b \sin(\tau - \Delta\varphi) \right] - \Delta\omega - \\ - \frac{c_1 R_2}{T_2} \left[(1 - x_2^2 - 2x_1^2) \sin(2\tau) + \frac{b}{2} \frac{x_1^2}{x_2} \sin(2\tau + \Delta\varphi) \right]. \end{cases} \quad (7)$$

Динамические характеристики БАГ. Фазовым пространством системы дифференциальных уравнений БАГ (7) с инерционным АЭ является трехмерное евклидово пространство \mathbb{R}^3 с координатами $(x_1, x_2, \Delta\varphi)$ [15]. Обобщенная разность фаз $\Delta\varphi$ представляет собой периодическую функцию. Фазовые траектории получены решением (7) в средах Octave/SciLab [16], [17] (рис. 3). На рисунке плоскость $(x_1, \Delta\varphi)$ расположена горизонтально, а ось x_2 – вертикально. При построении траекторий заданы факторы регенерации колебаний $c_1 R_1 = c_1 R_2 = 3$, добротности контуров $Q_1 = Q_2 = 200$, $f_1 = 10$ МГц, $T_1/T_2 = 2$ и характеристика АЭ $k = 13$ при расстройке контуров $\Delta\omega = 0$.

На рис. 3 представлены динамические процессы системы БАГ при отсутствии задержки в АЭ (рис. 3, а) и при наличии задержки (рис. 3, б). В фазовом пространстве существует один устойчивый режим – бигармонический (точка 1), для которого характерны ненулевые амплитуды сигналов двух колебаний $(x_1, x_2 > 0)$ с точно кратными

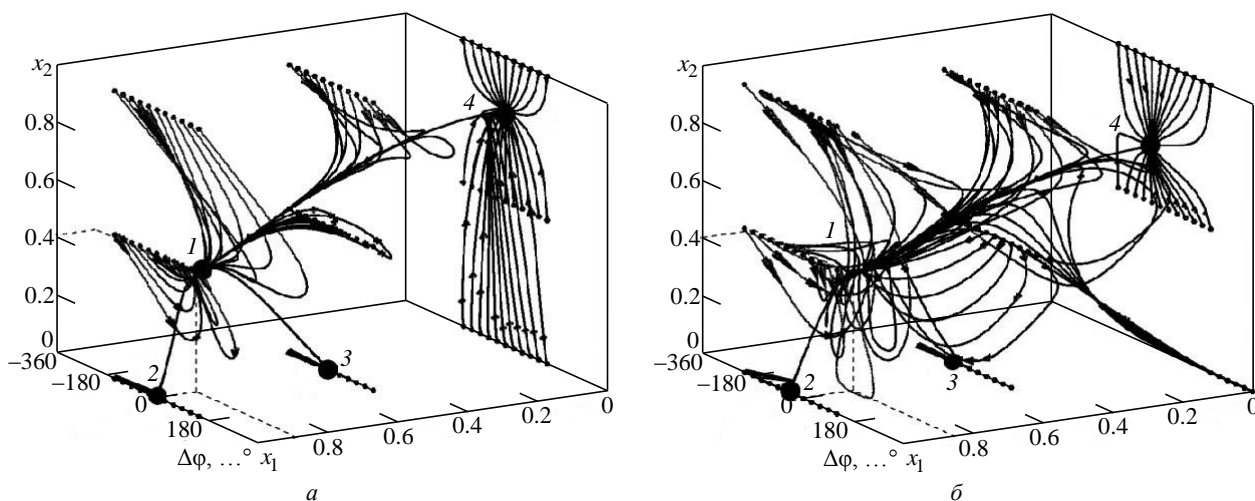


Рис. 3. Фазовый портрет при $\tau = 0$ (а) и $\tau = 25^\circ$ (б)

Fig. 3. Phase portrait for $\tau = 0$ (a) и $\tau = 25^\circ$ (б)

частотами. Точками 2–4 отмечены трехмерные особые точки типа "седло" [15].

При наличии задержки (рис. 3, б) седловая особая точка 4 приближается к особым точкам такого же типа 2 и 3, а устойчивый узел (рис. 3, а, точка 1) преобразуется в устойчивый узлофокус (рис. 3, б, точка 1).

Для наглядного представления динамики системы БАГ на рис. 4 показаны переходные про-

цессы x_1 , x_2 и $\Delta\varphi$ как функции времени t для некоторых начальных условий при двух значениях задержки. При отсутствии инерционности АЭ (рис. 4, а) переходные процессы при начальных условиях (НУ) 1 и 3 устанавливаются достаточно быстро, но при НУ 2 и 4 время переходного процесса увеличивается.

При наличии инерционности АЭ (рис. 4, б) возникают колебательные переходные процессы,

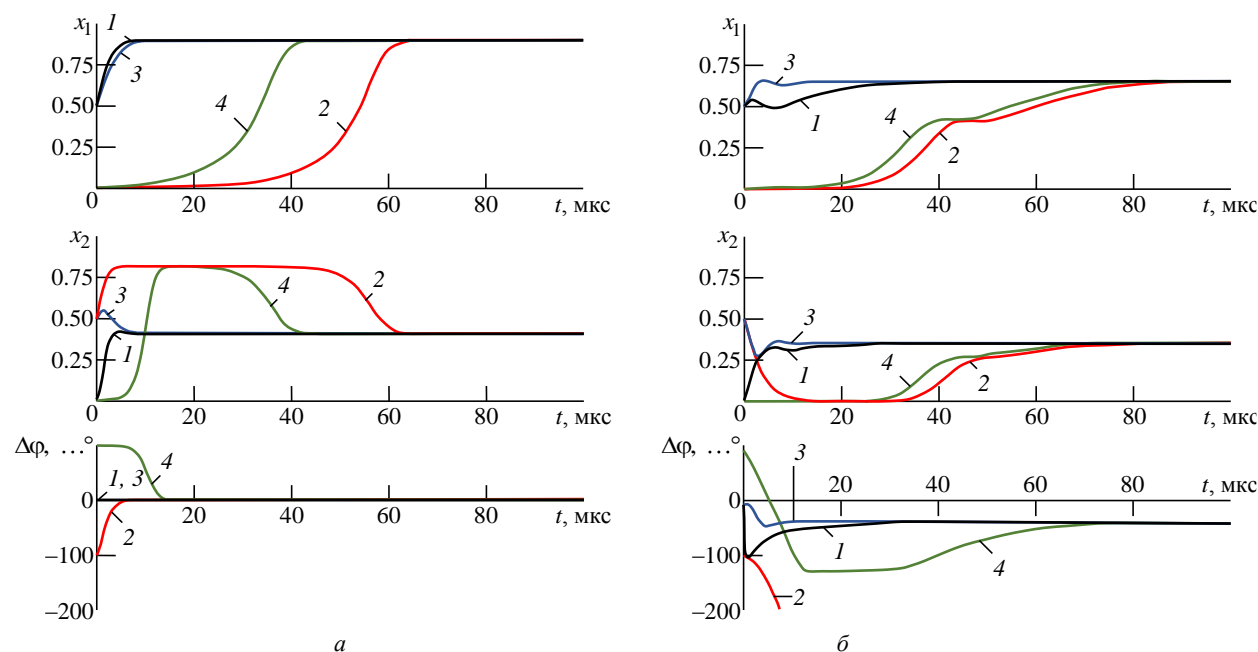


Рис. 4. Переходные процессы при $\tau = 0$ (а) и $\tau = 30^\circ$ (б) для различных начальных условий:
1 – $x_{10} = 0$; $x_{20} = 0.001$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 2 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 3 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = -90^\circ$;
4 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 0.5$; $\Delta\varphi_0 = -300^\circ$

Fig. 4. Transient processes at $\tau = 0$ (a) and $\tau = 30^\circ$ (б) for different initial conditions:
1 – $x_{10} = 0$; $x_{20} = 0.001$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 2 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = 0$; 3 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 1$; $\Delta\varphi_0 = -90^\circ$;
4 – $x_{10} = 0.5$; $x_{20} = 0.5$; $\Delta\varphi_0 = -300^\circ$

что является признаком устойчивого узлофокуса (см. рис. 3, б), а длительности переходных процессов увеличиваются. В частности, переходный процесс, представленный кривой 2 на рис. 4, б, столь продолжителен, что не приходит к установившемуся значению за время моделирования.

Из рис. 4 следует, что на начальном участке существует качественное изменение в переходном процессе второго колебания: в зависимости от значения амплитуды первого колебания его продолжительность может затянуться во времени. Это связано с тем, что при увеличении амплитуды первого колебания возрастает средняя крутизна, что приводит к росту запаса по самовозбуждению для второго колебания, а оно в свою очередь уменьшает среднюю крутизну второго колебания. В результате время переходного процесса, где колебания изменяются, увеличивается с ростом задержки АЭ.

Таким образом, при наличии задержки АЭ в системе существует устойчивый узлофокус с ненулевыми амплитудами (рис. 3, б, точка 1), т. е. существует устойчивый синхронный бигармонический режим.

Результаты эксперимента. Натурный эксперимент проводился с использованием n – p – n -транзистора ММВТ3904 [12]. На рис. 5 представлены спектральные плотности мощности ФШ моногармонического 1 и бигармонического 2 режимов в диапазоне отстрой от 10 Гц до 1 МГц. Измерение проводилось на измерителе ФШ Анаресо PNA 26.5 GHz. Видно, что работа в бигармоническом режиме уменьшает ФШ в среднем на 9 дБн/Гц. На отстрой-

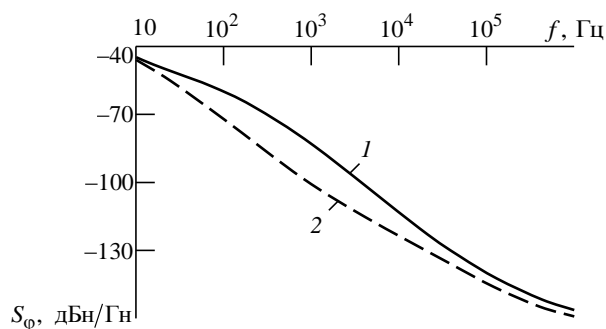


Рис. 5. Спектральная плотность мощности фазовых шумов бигармонического автогенератора в моногармоническом (1) и бигармоническом (2) режимах

Fig. 5. Power spectral density of the phase noise of the biharmonic oscillator in monoharmonic (1) and biharmonic (2) modes

ках около 0.5 кГц выигрыш по ФШ достигает 20 дБн/Гц. Таким образом, эксперимент подтверждает возможность существования синхронного бигармонического режима БАГ и уменьшения ФШ колебаний.

Заключение. В статье приводится анализ динамических процессов системы бигармонического автогенератора. Доказано существование устойчивого бигармонического режима двух колебаний с кратными частотами и ненулевыми амплитудами. При наличии задержки в БАГ из-за инерционности АЭ также показана возможность существования такого режима. Экспериментально показано, что бигармонический режим позволяет уменьшить фазовый шум основного колебания до 20 дБн/Гц.

Работа посвящается светлой памяти доктора технических наук Дмитрия Петровича Царапкина.

Авторский вклад

Фролов Даниил Андреевич – вывод, анализ и решение системы дифференциальных уравнений и их программирование. Подготовка текста статьи.

Сафин Ансар Ризаевич – анализ фазовых портретов и переходных процессов. Подготовка текста статьи.

Удалов Николай Николаевич – руководство работой, анализ фазовых портретов и переходных процессов. Подготовка текста статьи.

Сотсков Валерий Анатольевич – анализ решения системы дифференциальных уравнений. Подготовка текста статьи.

Author's contribution

Daniil A. Frolov, obtaining, analysis and solving of the system of differential equations and their programming. Preparation of the article text.

Ansar R. Safin, analysis of the phase portraits and transients. Preparation of the article text.

Nikolay N. Udalov, supervision of the study, analysis of phase portraits and transients. Preparation of the article text.

Valery A. Sotskov, analysis of solution of the system of the differential equations. Preparation of the article text.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nosal Z. M. Design of GaAs MMIC Transistors for the Low-Power Low Noise Applications // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp., Boston, USA, 11–16 June 2000. Digest. Piscataway: IEEE, 2000. doi: 10.1109/MWSYM.2000.860872
2. Low Frequency Noise Temperature Measurements in SiGe:CHeterojunction Bipolar Transistors / M. Seif, F. Pascal, B. Sagnes, A. Hoffmann, S. Haendler, P. Chevalier, D. Gloria // Intern. Conf. on Noise and Fluctuations, Xian, China, 2–6 June 2015. Piscataway: IEEE, 2000. doi: 10.1109/ICNF.2015.7288603
3. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator // IEEE Magnetics Lett. 2015. Vol. 6. Art. 3500704. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238
4. A Tunable Spin Wave Photonic Generator with Improved Phase Noise Characteristics / A. B. Ustinov, A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, V. V. Lebedev, A. N. Petrov, A. V. Shamrai, B. A. Kalinikos // J. of Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1326. Art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
5. Recent Investigations on BAW Resonators at Cryogenic Temperatures / M. Goryachev, S. Galliou, J. Imbaud, R. Bourquin, B. Dulmet, P. Abbé // Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proc. San Francisco, USA, 2–5 May 2011. Piscataway: IEEE, 2000. doi: 10.1109/FCS.2011.5977293
6. Tsarapkin D. P., Chichvarin M. I., Isakov I. A. Experimental Verification of Compensation Phenomena in Oscillators with Two Multiple Modes // Proc. of the IEEE/EIA Intern. Frequency Control Symp. and Exhibition, Kansas City, USA, 7–9 June 2000. P. 463–470. doi: 10.1109/FREQ.2000.887401
7. Уткин Г. М. Автоколебательные системы и волновые усилители. М.: Сов. радио, 1978. 272 с.
8. Карачев А. А., Левченков О. И., Царапкин Д. П. Экспериментальное исследование двухчастотного режима генератора Ганна // Тр. МЭИ. Вып. 317. Радиопередающие и радиоприемные устройства. М.: Изд-во МЭИ, 1977. С. 36–38.
9. Theory of Spin Torque Nano-Oscillator-Based Phase-Locked Loop / A. A. Mitrofanov, A. R. Safin, N. N. Udalov, M. V. Kapranov // J. of applied physics. 2017. Vol. 122, iss. 12. Art. 123903. doi: 10.1063/1.5004117
10. Митрофанов А. А., Сафин А. Р., Удалов Н. Н. Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наносциллятора, синхронизированного системой фазовой автоподстройки частоты // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 16. С. 29–35.
11. Царапкин Д. П., Фролов Д. А. К анализу характеристик транзисторного автогенератора с двумя синхронными модами // Двадцать четвертая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 15–16 марта 2018 г.: тез. докл. М.: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2018. С. 19.
12. <http://www.nxp.com> (дата обращения 06.08.2020)
13. Rohde U., Poddar A., Bock G. The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications. Theory and Optimization. New York: John Wiley & Sons, 2005. 543 p. doi: 10.1002/0471727172.fmatter
14. Grebennikov A. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. New York: John Wiley & Sons, 2007. 458 p. doi: 10.1002/9780470512098
15. Капранов М. В., Томашевский А. И. Анализ фазовых траекторий в окрестностях особых точек 2-D и 3-D нелинейных динамических систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 80 с.
16. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. Введение в Octave для инженеров и математиков. М.: ALT Linux, 2012. 368 с. (Библио. ALTLinux).
17. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В., Рудченко Е. А. Scilab: Решение инженерных и математических задач. М.: ALTLinux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 260 с. (Библио. ALTLinux).

Информация об авторах

Фролов Даниил Андреевич – магистр наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (2015), аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов (ФОРС) Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ" (ТУ). Сфера научных интересов – объемные резонаторы, радиотехника, стабилизация частоты автоколебаний.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ТУ), ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: frolovdan12@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Сафин Ансар Ризаевич – кандидат технических наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (2014), доцент (2020), заведующий кафедрой ФОРС НИУ "МЭИ", старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (РАН). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника, физика магнитных явлений, спинтроника.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ТУ), ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

Удалов Николай Николаевич – доктор технических наук по специальности "Радиотехника" (1995), профессор (1996) кафедры ФОРС НИУ "МЭИ". Автор более 180 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника, системы фазовой автоподстройки.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ТУ), ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: udalovnn@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0952-4076>

Сотсков Валерий Анатольевич – инженер по специальности "Радиотехника" (Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, 1986), научный сотрудник Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Автор более 30 публикаций. Сфера научных интересов – радиотехника, электроника, системы передачи информации на основе волоконно-оптических линий связи.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт общей физики им. А. М. Прохорова" РАН, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия

E-mail: valerio07@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5152-251X>

References

1. Nosal Z. M. Design of GaAs MMIC Transistors for the Low-Power Low Noise Applications. 2000 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symposium. Boston, USA, 11–16 June 2000. Digest. Piscataway, IEEE, 2000. doi: 10.1109/MWSYM.2000.860872
2. Seif M., Pascal F., Sagnes B., Hoffmann A., Haendler S., Chevalier P., Gloria D. Low Frequency Noise Temperature Measurements in SiGe:C Heterojunction Bipolar Transistors. 2015 Intern. Conf. on Noise and Fluctuations. Xian, China, 2–6 June 2015. Piscataway, IEEE, 2000. doi: 10.1109/ICNF.2015.7288603
3. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator. IEEE Magnetics Letters. 2015, vol. 6, art. 3500704. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238
4. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Lebedev V. V., Petrov A. N., Shamrai A. V., Kalinikos B. A. A Tunable Spin Wave Photonic Generator with Improved Phase Noise Characteristics. J. of Phys.: Conf. Ser. 2019, vol. 1326, art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
5. Goryachev M., Galliou S., Imbaud J., Bourquin R., Dulmet B., Abbé P. Recent Investigations on BAW Resonators at Cryogenic Temperatures. 2011 Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proc., San Francisco, USA, 2–5 May 2011. Piscataway, IEEE, 2000. doi: 10.1109/FCS.2011.5977293
6. Tsarapkin D. P., Chichvarin M. I., Isakov I. A. Experimental Verification of Compensation Phenomena in Oscillators with Two Multiple Modes. Proc. of the 2000 IEEE/EIA Intern. Frequency Control Symposium and Exhibition, Kansas City, USA, 7–9 June 2000, pp. 463–470. doi: 10.1109/FREQ.2000.887401
7. Utkin G. M. self-Oscillating systems and volnew amplifiers. M., Sov. radio, 1978, 272 p. (In Russ.)
8. Karachev A. A., Levchenkov O. I., Carapkin D. P. Experimental study of the two-frequency response of the Gann generator. Tr. MEI. Radio transmitting and radio receiving devices, Moscow, MEI publishing House, 1977, iss. 317, pp. 36–38. (In Russ.)
9. Mitrofanov A. A., Safin A. R., Udalov N. N., Kapranov M. V. Theory of Spin Torque Nano-Oscillator-Based Phase-Locked Loop. J. of applied physics. 2017, vol. 122, iss. 12, art. 123903. doi: 10.1063/1.5004117
10. Mitrofanov A. A., Safin A. R., Udalov N. N. Amplitude and phase noise of a spin-transfer nanoscillator synchronized by a phase-locked frequency adjustment system. Letters to ZhTF. 2015, vol. 41, iss. 16, pp. 29–35 (In Russ.)
11. Carapkin D. P., Frolov D. A. To analyze the characteristics of a transistor autogenerator with two synchronous modes. Twenty-fourth int. scientific and technical Conf. of students and postgraduates. TEZ. Dokl. Moscow, March 15–16, 2018. M.: LLC "Center of printing services "Raduga", 2018, 19 p. (In Russ.)
12. <http://www.nxp.com> (accessed 06.08.2020)
13. Rohde U., Poddar A., Bock G. The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications. Theory and Optimization. New York, John Wiley & Sons, 2005, 543 p. doi: 10.1002/0471727172.fmatter
14. Grebennikov A. RF and microwave transistor oscillator design. New York, John Wiley & Sons, 2007, 458 p. doi: 10.1002/9780470512098
15. Kapranov M. V., Tomashevsky A. I. Analysis of phase trajectories in the vicinity of special points of 2-D and 3-D nonlinear dynamical systems. Textbook. Moscow, Izd-vo MEI, 2003, 80 p. (In Russ.)
16. Alekseev E. R., Chesnokova O. V. Introduction to Octave for engineers and mathematicians. Moscow, ALT Linux, 2012, 368 p. (In Russ.)
17. Alekseev E. R., Chesnokova O. V., Rudchenko E. A. Scilab: Solving engineering and mathematical problems. Moscow, ALT Linux; BINOM. Laboratory of knowledge, 2008, 260 p. (Bibl. ALT Linux). (In Russ.)

Information about the authors

Daniil A. Frolov, Master of Sci. Degree in "Radio engineering including television systems and devices" (2015) postgraduate student of the department of Formation and processing of radio signals (FPRS) of the National Research University (NRU) "MPEI" (TU). Area of expertise: cavity resonators, radio engineering, frequency stabilization of oscillations.

Address: National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: frolovdan12@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) in "Radio Engineering Including Television Systems and Devices" (2014), Associate Professor (2020), head of the department of radio signal generation and processing of the NRU "MPEI", senior researcher of the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science Named after V. A. Kotelnikov. The author of more than 50 scientific papers. Area of expertise: radiophysics and electronics, physics of magnetic phenomena, spintronics.

Address: National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

Nikolay N. Udalov, Dr. Sci. (Eng.) in Radio Engineering (1995), Professor (1996) of NRU MPEI (TU). Author of more than 180 scientific papers. Area of expertise: radio engineering, systems of phase locked loops.

Address: National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: udalovnn@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0952-4076>

Valery A. Sotskov, Engineer on Radio Engineering (1986, Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation), the researcher at the Institute of General Physics n. a. A. M. Prokhorov of RAS, Moscow. Author of more than 30 scientific papers. Area of expertise: radio engineering, electronics, information transmission systems based on fiber-optic communication lines.

Adress: Prokhorov General Physics Institute of RAS, 38, Vavilova St., Moscow 119991, Russia

E-mail: valerio07@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5152-251X>
